

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA CIVIL E INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
ANÁLISIS DEL FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
DE PASTAS DE CEMENTO SUSTITUIDAS PARCIALMENTE POR POLVO
CERÁMICO**

**AUTORES:
MOLINA HERNÁNDEZ BRYAN PATRICIO
TERÁN LÓPEZ JACKELINE PAMELA**

**TUTORA:
LUCERO MARISOL SERRATO ARIAS**

Quito, Diciembre 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Bryan Patricio Molina Hernández, con documento de identificación N° 1719204628 y Jackeline Pamela Terán López con documento de identificación N° 1723418974, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **ANÁLISIS DEL FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PASTAS DE CEMENTO SUSTITUIDAS PARCIALMENTE POR POLVO CERÁMICO**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil e Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....
Nombre: Bryan Patricio Molina
Hernández
Cédula: 1719204628

.....
Nombre: Jackeline Pamela Terán
López
Cédula: 1723418974

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Lucero Marisol Serrato Arias declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo académico: ANÁLISIS DEL FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PASTAS DE CEMENTO SUSTITUIDAS PARCIALMENTE POR POLVO CERÁMICO, realizado por Bryan Patricio Molina Hernández y Jackeline Pamela Terán López, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2019



.....
Lucero Marisol Serrato Arias

C.I: 1757028897

ANÁLISIS DEL FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PASTAS DE CEMENTO SUSTITUIDAS PARCIALMENTE POR POLVO CERÁMICO

COMPRESSIVE STRENGTH AND SETTING TIME ANALYSIS FOR CEMENT PASTES WITH PARTIAL CERAMIC POWDER CONTENT

Bryan Molina- Hernández ¹, Pamela Terán -López ²

Resumen

La presente investigación se enfocó en proponer un uso en el campo de la construcción a los residuos cerámicos que son desechados por la empresa ecuatoriana EDESA S.A. hacia los rellenos sanitarios de la ciudad de Quito, tratando de disminuir el impacto ambiental que éstos generan en el suelo. El uso de los residuos cerámicos consiste en llevarlos a un tamaño de partícula que pase el tamiz #200 y sustituirlos parcialmente por cemento en cantidades de 5%, 7.5%, 10%, 12.5% y 15%, que posteriormente será analizado este nuevo componente de cemento-cerámico bajo los requisitos de desempeño para cementos hidráulicos dados por la normativa NTE INEN 2380, focalizados a determinar la resistencia a la compresión, contenido de aire en morteros así como también determinar el tiempo de fraguado y cambio de longitud por autoclave en pastas.

Palabras Clave: Cemento, Pastas, Tiempo de fraguado, Residuos cerámicos, Resistencia a la Compresión.

Abstract

The aim of this study is to propose the use of ceramic waste obtained from the Ecuadorian Company EDESA S. A. in the construction sector. Such wastes are sent to landfills in the city of Quito, and its use in construction would reduce the environmental risks that such waste in this application consist of obtaining a #200 sieve particle size and adding this powder to the cement mixture in quantities of 5%, 7.5%, 10%, 12% and 15% in order to replace cement, later analyzing this new ceramic-cement mixture in accordance with hydraulic cements performance requirements under Ecuadorian NTE INEN 2380 standards, focused on testing compressive strength, air content of cement mortar, as well as determining setting time and autoclave expansion variations of the different cement pastes.

Keywords: Cement, Pastes, Setting time, Compressive Strength.

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador

Autor para correspondencia ✉: bmolinah1@est.ups.edu.ec

² Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador

Autor para correspondencia ✉: jteranl@est.ups.edu.ec

1. Introducción

Actualmente el aumento de la producción de cerámica en las industrias del país se ha visto en un paulatino crecimiento debido al incremento poblacional que se ha podido estimar en los últimos años, especialmente en la ciudad capital donde a finales del 2018 ha llegado a tener 2 690 150 habitantes [1], por lo cual la necesidad de una vivienda digna para sus ciudadanos se ha hecho presente en el sector de la construcción. Este incremento de producción de cerámica se ve ligado al aumento de sus residuos, como es el caso de EDESA S.A. que genera aproximadamente 2 toneladas mensuales de residuos cerámicos sanitarios que no cumplen con las especificaciones técnicas, representando de esta manera el 4% de su producción mensual [2].

Estos residuos cerámicos en la ciudad de Quito contribuyen 0,43% de residuos sólidos urbanos inertes [3] que no presentan uso alguno y generan impacto ambiental en el suelo por sus contenidos químicos. Debido a estos datos, surge la necesidad de desarrollar aplicaciones de ciertos materiales que sean desechos de algún proceso productivo, que presenten potencial de sustituir al cemento sin reducir drásticamente las propiedades de los materiales base cemento (hormigones, morteros, pastas) y que permitan, de esta manera, una reducción de residuos sólidos en los rellenos sanitarios.

A nivel mundial se han realizado diferentes investigaciones para dar uso a los residuos cerámicos tanto como adiciones así como sustituciones por el cemento, por ejemplo, una realizada en España en donde se evaluó la reactividad puzolánica de los residuos cerámicos de diferentes empresas de fabricación de baldosas y se analizó su factibilidad como reemplazo parcial del cemento [4].

La mayoría de publicaciones dan énfasis al posible cambio del comportamiento en las propiedades de morteros y hormigones fabricados en base a pastas de cemento con adiciones de

residuos cerámicos [5] y no únicamente con polvos residuales de cerámicas sanitarias, como es el caso de una investigación elaborada en Japón en el cual dan uso a desechos cerámicos de los aislantes eléctricos [6].

Estas condiciones dan paso al desarrollo del presente artículo académico, en donde se analizará la incidencia que provoca el remplazo de cemento por polvo cerámico a la compresión y tiempos de fraguado de pastas de cemento modificadas y adicionalmente se analizarán los requisitos de desempeño para cementos hidráulicos, con el fin de caracterizar los diferentes porcentajes de sustitución por polvo cerámico tal y como se lo haría con cualquier tipo de cemento.

2. Materiales y Métodos

En el presente artículo se determinó la resistencia a la compresión y el análisis del tiempo de fraguado de pastas de cemento sustituidas parcialmente por polvo cerámico en los porcentajes mencionados a continuación: 5, 7.5, 10, 12.5, 15%; en donde los materiales usados fueron cemento tipo GU de marca ATENAS®, arena normalizada ASTM C778 y polvo cerámico. Para lo cual el polvo cerámico fue obtenido mediante la molienda y trituración de residuos de cerámicos sanitarios de la fábrica EDESA, y posteriormente se tamizó dicho material hasta obtener el pasante del tamiz N° 200.

Los ensayos realizados estuvieron en función de la normativa Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos NTE INEN 2380 [7], en la cual se cumplió con los ensayos estipulados para un cemento tipo GU, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Requisitos físicos normalizados.

Ensayo	Norma del ensayo aplicable	Cemento Tipo GU
Cambio de longitud por autoclave, % máximo.	INEN 200	0,8
Tiempo de fraguado, método de Vicat.		
Inicial, no menos de, minutos.	INEN 158	45
Inicial, no más de, minutos.		420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	A
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo.		
1 día.		--
3 días.	INEN 488	13
7 días.		20
28 días.		28

A El valor obtenido en el mortero no garantiza necesariamente que el contenido de aire en el hormigón sea el mismo.

A continuación, se adjuntan en la Tabla 2 los ensayos previos que son requeridos para llevar a cabo cada uno de los requisitos de desempeño.

Tabla 2. Ensayos previos

Ensayo	Norma del ensayo aplicable
Cambio de longitud por autoclave.	INEN 200
- Mezclado mecánico de pastas.	INEN 155
- Determinación de consistencia normal para pastas.	INEN 157
Tiempo de fraguado, método de Vicat.	INEN 158
- Mezclado mecánico de pastas.	INEN 155
- Determinación de consistencia normal para pastas.	INEN 157
Contenido de aire del mortero	INEN 195
- Determinación de densidad del cemento.	INEN 156
- Mezclado mecánico de morteros.	INEN 155
- Determinación de flujo de morteros.	INEN 2502
Resistencia a la compresión.	INEN 488
- Mezclado mecánico de morteros.	INEN 155
- Determinación de flujo de morteros.	INEN 2502

Para la determinación de la fluidez en las pruebas preliminares, se establecieron límites de fluidez inferiores a los mencionados en la norma NTE INEN 2502 [8], ya que en dicha norma el flujo debe cumplir con $(110 \pm 5)\%$, pero en la presente investigación se ajustó el flujo a $(110 \pm 2)\%$, con el fin de cumplir con los rangos establecidos en la norma antes mencionada al momento de la determinación de la fluidez para los ensayos definitivos.

Adicionalmente, cabe mencionar que en todos los ensayos las masas de cemento fueron sustituidas parcialmente por cada porcentaje de cerámica correspondiente.

Es importante señalar que, para la presente investigación, fue necesaria la

fabricación de cubos de mortero de 50mm de arista para analizar la resistencia a la compresión (NTE INEN 488), a pesar de que el tema de la investigación se basa en el análisis de pastas de cemento. Esto responde a que, al realizar sustituciones parciales de cemento por polvo cerámico, se está creando un nuevo material cementante, mismo que debe ser analizado bajo los métodos de ensayo propuestos en el literal 9 de la norma NTE INEN 2380. Por otra parte como indica el alcance de la norma NTE INEN 488 permite determinar la resistencia a la compresión del cemento hidráulico, por lo cual a su vez se establece el uso de arenas normalizadas para la fabricación de morteros mismas que no tendrán incidencia alguna sobre los resultados tanto físicos como mecánicos del análisis del cemento hidráulico.

2.1 Diseño de cubos de 50 mm de mortero

Para la fabricación de las probetas de ensayo para cada porcentaje de reemplazo cerámico, se consideró la metodología descrita según la norma NTE INEN 488, en donde las cantidades de materiales a usar en una amasada de mortero para seis especímenes de ensayo y de tal manera cumplir con el flujo requerido, se presentan a continuación en la tabla 3:

Tabla 3. Tabla resumen dosificación para fabricación de 6 cubos de mortero.

% Cerámica	Masa de agua (g)	Masa de arena (g)	Masa de cerámica (g)	Masa de cemento (g)	Flujo Promedio
0	253.5	1375	0.00	500.0	110
5	251.5	1375	25.0	475.0	111
7.5	250.0	1375	37.5	462.5	110
10	247.5	1375	50.0	450.0	108
12.5	246.5	1375	62.5	437.5	106
15	247.5	1375	75.0	425.0	105

Para el ensayo de compresión se realizó un total de 144 especímenes, mostrados en la Tabla 4; cada edad de ensayo tuvo una amasada con un total de 6 especímenes, lo cual fue igual para cada porcentaje de cerámica sustituida. En las Fotografías 1 y 2 se puede visualizar tanto el material cerámico como el cemento antes de ser mezclados.



Fotografía 1. Pesaje masa de cemento al 85% y de polvo cerámico al 15%



Fotografía 2. Preparación de materiales para fabricación de cubos de mortero

Tabla 4. Número de especímenes realizados

% de cerámica	Edades a ensayar	Especímenes por edad	Especímenes de ensayo Total
0	1,3,7,28	6	24
5	1,3,7,28	6	24
7,5	1,3,7,28	6	24
10	1,3,7,28	6	24
12,5	1,3,7,28	6	24
15	1,3,7,28	6	24
Total de especímenes de ensayo			144

2.2 Diseño de probetas para determinación del tiempo de fraguado

Para el presente ensayo se realizaron 6 especímenes correspondientes a cada porcentaje de sustitución cerámica, para los cuales se buscó de manera experimental la cantidad de agua necesaria para cumplir con la penetración establecida en la norma NTE INEN 158 [9]. En la Tabla 5 se muestran las cantidades usadas para los especímenes.

Tabla 5. Dosificación para espécimen de ensayo

% Cerámica	Masa de agua (g)	Masa de cerámica (g)	Masa de cemento (g)
0.00	171.00	0.00	650.00
5.00	171.00	32.50	617.50
7.50	171.20	48.75	601.25
10.00	171.20	65.00	585.00
12.50	171.60	81.25	568.75
15.00	172.00	97.50	552.50

3. Resultados y Discusión

3.1 Composición Química

Para este parámetro se han obtenido valores proporcionados por la fábrica de cerámicas (año 2011), en la Tabla 6 se detallan sus componentes en función de óxidos sus correspondientes porcentajes.

Tabla 6. Compuestos químicos.

Óxido	% Presente en la Cerámica
SiO_2	68.50
Al_2O_3	22.80
Fe_2O_3	0.87
CaO	0.88
MgO	0.36
K_2O	1.86
Na_2O	3.00
TiO_2	0.78
L.O.I*	0.44

* L.O.I (lost of incineration/pérdidas por calcinación)

3.2 Resistencia a la Compresión

3.2.1 Dosificación de agua para cubos de 5 mm para obtener la resistencia a la compresión.

Se dice que la correcta dosificación de un mortero, viene dada por la cantidad de materiales que logren obtener una relación adecuada de agua y cemento para alcanzar una fluidez establecida.

La fluidez se la obtiene midiendo el aumento porcentual de los cuatro diámetros en la mesa vibratoria de flujo. La importancia de determinar la fluidez radica en que ésta representa de cierto modo la trabajabilidad y facilidad de colocación del mortero en obra [10].

Con el fin de cumplir con el flujo estipulado en la norma INEN 488, se estableció la cantidad de agua necesaria para obtener una fluidez de $110\% \pm 5\%$ como se muestra en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7. Relación a/c y flujos

% Cerámica	Relación a/c	Flujo Promedio
0	0.507	110
5	0.503	111
7.5	0.500	110
10	0.495	108
12.5	0.493	106
15	0.495	105

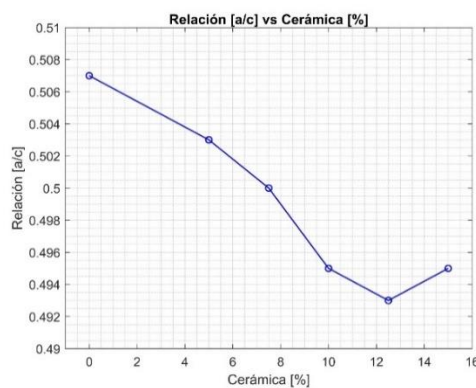


Figura 1. Relación a/c para los diferentes porcentajes de sustitución cerámica.

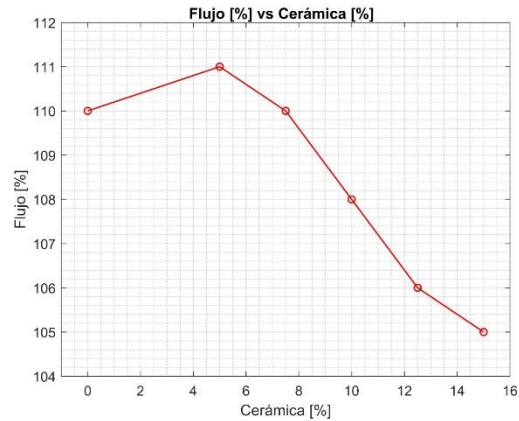


Figura 2. Flujos promedio para los diferentes porcentajes de sustitución cerámica.

Como se puede evidenciar en la Ilustración 1, el porcentaje de agua requerida es menor al aumentar la cantidad de sustitución cerámica, es decir inversamente proporcional. Salvo en el 15% de cerámica en donde se puede visualizar un leve aumento de la cantidad de agua necesaria, en comparación a la tendencia que se evidenciaba para el resto de porcentajes.

Comparando los valores de agua necesarios para obtener el flujo adecuado en la presente investigación con el trabajo realizado por Viera, P & Chicaiza, C. [11] se puede notar que la relación a/c obtenida en ese caso es de 0.60 y eso se debe a que en dicha investigación no se utilizó la arena normalizada ASTM C778 para la fabricación de los morteros, por ende, al usar una arena que sí posee absorción la cantidad de agua a emplearse debe ser mayor.

Se puede establecer la razón por la cual al trabajar con cemento, arena y agua la relación a/c se ve disminuida al realizar las sustituciones en mayor porcentaje en masa, con respecto a la tendencia de aumento de agua que se presenta cuando únicamente se usa cemento y agua y se debe a que al incorporar arena normalizada, ésta es más gruesa y, como consecuencia, tiene una superficie específica más pequeña, es decir presenta menor adsorción y por ello requiere menor

cantidad de agua, para alcanzar el flujo necesario [12].

Además al unir un material cementante con arena, la cantidad de vacíos que deben ser llenados por el agua que no reacciona con el cemento, es menor por ello la cantidad de agua también se ve disminuida. Así mismo en la Ilustración 2, se verifica que los flujos con los cuales se trabajó al momento de realizar las mezclas definitivas están dentro del rango de fluidez preestablecido.

3.2.2 Resistencia a la compresión para las edades de 1,3,7 y 28 días.

En base a las cargas totales máximas de la falla, obtenidas al momento de ensayar los cubos de mortero, conociendo el área de la sección transversal de los mismos, aplicando la ecuación proporcionada en la norma INEN 488 y teniendo en cuenta que se realizó un promedio de los tres valores más altos de la resistencia para los especímenes fabricados para cada edad de ensayo de la amasada del mortero. A continuación, se presentan en la Tabla 8 los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión correspondiente para cada reemplazo de componente cemento-cerámico:

Tabla 8. Tabla resumen resistencia a compresión

% Cerám ica	Resisten cia a compres ión día 1	Resisten cia a compres ión día 3	Resisten cia a compres ión día 7	Resisten cia a compres ión día 28
(MPa)				
0	6.44	14.33	21.52	28.300
5	6.16	13.48	18.65	27.803
7.5	5.87	12.93	18.51	26.369
10	5.52	12.67	18.47	24.689
12.5	5.40	11.77	16.58	23.445
15	4.80	11.22	15.82	22.443

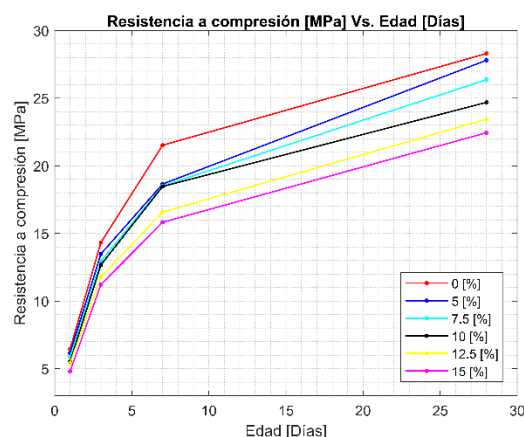


Figura 3. Resistencia Vs Edad



Fotografía 3. Compresión de cubos de mortero 0% de sustitución para el día 3

Como se puede apreciar en la Ilustración 3, la resistencia a la compresión al día 28 obtenida para el 100% de masa de cemento, es decir sin reemplazo cerámico alguno es de 28.30 MPa, cumpliendo de tal manera con lo estipulado en los requisitos de desempeño para cementos hidráulicos de la norma INEN 2380. Dado que el principal objetivo del presente artículo académico es determinar el porcentaje óptimo de reemplazo de residuos cerámicos, mismo que no afecte potencialmente en sus propiedades físico-mecánicas y permita de cierto modo la reutilización de dichos residuos cerámicos sanitarios, se ha determinado que los porcentajes más factibles de ser utilizados son el 5 y 7.5% respectivamente, ya que se encuentran dentro del rango de resistencia máximo

permisible entre especímenes el cual corresponde al 8.7% del promedio de la resistencia [13] obtenida para el reemplazo cerámico del 0%, con un valor de 2.4621 MPa. Por tal motivo las resistencias obtenidas al día 28, para ambos porcentajes mencionados anteriormente no exceden dicho rango.

Los valores de resistencia reflejados son comparables con los obtenidos por Viera, P & Chicaiza, C.[11], en su investigación, en donde presentan un valor de resistencia a la compresión de 34.33 MPa para el día 28 correspondiente para el 0% de reemplazo cerámico, se puede evidenciar que sus valores exceden en 6.03MPa, en comparación a los obtenidos en el presente artículo y esto se le atribuye a el siguiente motivo. La razón es que para la fabricación de los cubos de mortero Viera, P & Chicaiza no utilizan arena graduada normalizada como se mencionó anteriormente, con graduación predominante en el tamiz N°30 y N°100, a cambio de ello usan arena de la mina Fucusucu III, con graduación predominante en el tamiz N°16 y N°50, basándose en la graduación de árido requerida para uso en morteros de mampostería. Es por tal motivo que al ser una arena extraída de minas, no presenta la misma forma y textura de partículas redondeadas que la arena normalizada, de hecho, sus granos al ser obtenidos por trituración, podrían presentar características con aristas más agudas y con formas ciertamente astillosas que alterarían directamente con los ensayos realizados en laboratorios debido a la incidencia en la adherencia entre las partículas del árido con la pasta cementante misma que se ve reflejada en la variación de la resistencia [14].

En la Fotografía 3 se puede observar un cubo de mortero siendo ensayado en la máquina de compresión.

3.3 Determinación del Tiempo de fraguado en pastas de Cemento

3.3.1 Determinación de la consistencia normal.

La obtención de la consistencia normal es una de las principales características del cemento, ya que ésta permite conocer el tiempo durante el cual se tiene una pasta de cemento y agua trabajable y manipulable, además permite conocer el tiempo disponible para realizar mezclas, transportarlas, colocarlas en obra [15]. En la presente investigación se usó Cemento ATENAS Tipo GU obteniendo el resultado que se muestra a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9. Consistencia normal y penetración obtenidas

% Cerámica	Consistencia (%)	Penetración (mm)
0	26.31%	10
5	26.31%	10
7.5	26.34%	10
10	26.34%	9
12.5	26.40%	9
15	26.46%	9

Para la consistencia correspondiente al 100% de masa de cemento, se observa un valor de 26.31% , mismo que es comparable con la determinada en el trabajo de Anasi, C. [16] en donde usando cemento Holcim obtienen una consistencia normal correspondiente al 27%.

Otro trabajo a citar para la consistencia normal es de Viera, P. & Chicaiza, C.[11], en donde la cantidad de agua requerida es del 28.5% con una penetración de 10mm para cemento tipo GU. Por tal motivo se puede verificar que los valores son cercanos. Además en el presente trabajo se está cumpliendo con la penetración estipulada en la norma INEN NTE 157 [17]. Como se puede evidenciar en la Tabla 8 a mayor porcentaje de sustitución cerámica, se incrementa la cantidad de agua necesaria para alcanzar

la penetración requerida por normativa, lo cual se lo atribuye a la presencia de sílice y alúmina en altos porcentajes la incorporación de dichos elementos en los compuestos de cemento aumentan la trabajabilidad y consistencia [18].

Dichos resultados tienen correlación con los resultados de la prueba de consistencia y plasticidad emitidos por Jackiewicz [12] que muestran que a el contenido de filler cerámico es directamente proporcional a la adición de agua, por lo que también aumenta el tiempo de retención y de trabajabilidad que es visible en la Tabla 10 del presente artículo.

Esto se puede atribuir claramente a la mayor absorción de agua que presenta el material de desecho cerámico.

3.3.2 Tiempo de fraguado inicial

El cálculo del tiempo de fraguado inicial viene dado en la norma INEN 158 por la siguiente Fórmula [9]:

$$\left(\left(\frac{(H-E)}{(C-D)} \right) \times (C - 25) \right) + E \quad (1)$$

Donde:

E= tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25mm,

H= tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25mm,

C= lectura de penetración al tiempo E, y

D= lectura de penetración al tiempo H.

3.3.3 Tiempo de fraguado final

Se determinó dicho tiempo en base a los minutos transcurridos desde el contacto inicial entre el cemento y agua, hasta el momento que la ajuga del aparato de Vicat no deja huella sobre la probeta del espécimen.

Una vez realizado el ensayo bajo la metodología de la norma INEN 158 según el método de Vicat A aparato manual de aguja de Vicat, se han obtenido los tiempos indicados en la Tabla 10 para los diferentes reemplazos de polvo cerámico:

Tabla 10. Resumen tiempos de fraguado obtenidos.

% Cerámica	Fraguado Inicial (min)	Fraguado Final (min)
0	195.00	585.00
5	203.00	570.00
7.5	203.00	570.00
10	201.00	570.00
12.5	200.00	570.00
15	200.00	570.00



Fotografía 4. Ensayo tiempos de fraguado para 0% de sustitución en aparato de Vicat.

Se puede constatar que el tiempo de fraguado inicial es mayor a 45 mas no mayor de 420 minutos mismo que corresponde al rango de tiempo inicial según la norma NTE INEN 2380. En la Fotografía 4 se muestra el aparato de Vicat durante el ensayo de tiempo de fraguado.

Con lo anteriormente expuesto, se tienen indicios para suponer que la presencia del polvo cerámico no afecta drásticamente al fraguado inicial de la pasta. Se observa una constante en el fraguado final de las pastas modificadas que son 15 minutos menos respecto a la pasta ordinaria, lo cual se lo puede atribuir a la presencia de alúmina (Al_2O_3), puesta en la Tabla 6.

La alúmina u óxido aluminico es un componente del clínker, mismo que incide en el comportamiento del cemento, especialmente en el fraguado y calor de

hidratación [19]. Así mismo los aluminatos generan fraguados relativamente menores debido a que presentan hidratación a gran velocidad [20].

3.4 Determinación de la expansión en Autoclave

Este ensayo permite conocer la posible expansión que sufrirá el cemento cuando se encuentre expuesto a condiciones de humedad en períodos de tiempo prolongados [21].

Una de las causas probables que también daría lugar a una expansión destructiva es la presencia de grandes cantidades de óxido de magnesio (periclase), el cual al entrar en contacto con agua se hidrata lentamente después del fraguado del cemento y forma un hidróxido que provoca una expansión diferida lo cual se puede evidenciar mediante agrietamientos de los elementos [22].

Para los respectivos cálculos la norma NTE INEN 200 [23] solicita calcular el cambio de longitud de las muestras de ensayo restando la lectura obtenida en el comparador de longitud antes del ensayo en autoclave de aquella registrada después del ensayo en autoclave y reportarlo como porcentaje de la longitud inicial de la barra al 0,01 % más cercano.

$$\text{Cambio de longitud (\%)} = \frac{\text{Lect. Inicial} - \text{Lect. Final}}{250} \quad (2)$$

Para este caso la lectura obtenida en el comparador corresponde al valor de 250 mm que representa la longitud nominal de la sección transversal de los moldes establecida en los materiales de la norma, descontando la medida de los bornes. Los valores obtenidos se indican a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Cambio de longitud en autoclave.

% Cerámica	Nomenclatura	Lect. Inicial (mm)	Lect. Final (mm)	Cambio de longitud (%)
0	M1_0	0.751	0.709	0.02%
	M2_0	-	-	0.02%
5	M1_5	0.266	0.184	0.03%
	M2_5	0.023	0.058	0.03%
7.5	M1_7.5	0.267	0.184	0.03%
	M2_7.5	-	-	0.03%
10	M1_10	0.069	0.006	0.03%
	M2_10	0.144	0.075	0.03%
12.5	M1_12.50	0.543	0.534	0.00%
	M2_12.50	0.226	0.216	0.00%
15	M1_15	0.428	0.366	0.02%
	M2_15	-	-	0.02%

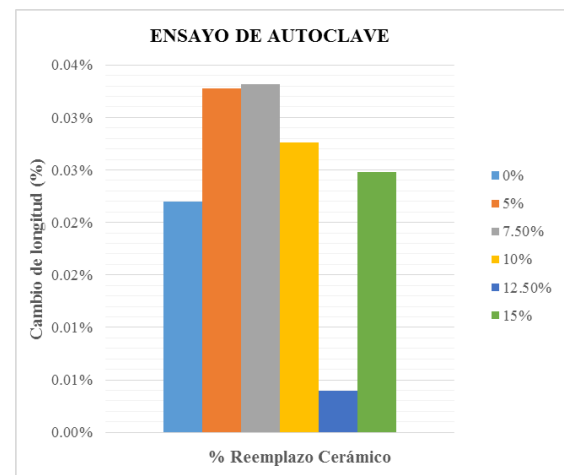


Figura 4. Cambio Longitud en Autoclave

En este caso se puede observar en la Ilustración 4 que la expansión que presentan todos los porcentajes de reemplazo cerámico están muy por debajo del máximo establecido en la norma indicado en la Tabla 1, por lo cual se

determina que la sustitución de cemento por polvo cerámico no tiene influencia sobre la expansión o contracción de pastas cementantes ya que las cantidades de óxido de magnesio son bajas en la composición química previamente indicada en la Tabla 6.



Fotografía 5. Medición barra de pasta de cemento para ensayo de autoclave.



Fotografía 6. Colocación probetas de ensayo en disco de ruptura.



Fotografía 7. Probetas de pasta de cemento dentro del Autoclave. Previo a la ejecución del ensayo.

3.5 Densidad del Cemento y Cerámica

Este ensayo se llevó a cabo de acuerdo a la norma NTE INEN 156 [24], y se lo realizó mediante la utilización del frasco de Lechatelier, con las respectivas consideraciones respecto a la densidad recomendable del líquido a utilizarse misma que debe ser de 0.73g/cm^3 , para este caso se utilizó gasolina; así mismo, teniendo en cuenta el debido control de temperatura del mismo con $23\pm 2^\circ\text{C}$, para lo cual se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 12.

Tabla 12. Densidades del Cemento y Cerámica.

			Cemen to	Cerámi ca
Masa inicial				
Probeta+gasolina	(A)	g	321.68	321.67
Masa final				
Probeta+gasolina	(B)	g	385.85	385.88
Volumen inicial				
Probeta+gasolina	(C)	cm^3	0.20	0.20
Volumen final				
Probeta+gasolina	(D)	cm^3	22.60	25.60
Masa (A-B)	(E)	g	64.17	64.21
Volumen (C-D)	(F)	cm^3	22.40	25.40
Densidad (E/F)	(G)	g/cm^3	2.865	2.528

El resultado obtenido en la presente investigación es comparable con la densidad obtenida por Anasi, N. [8] que arroja un valor de densidad correspondiente a 2.89 g/cm^3 para el tipo de cemento GU de la cementera HOLCIM y a su vez un valor de 2.56 g/cm^3 para el polvo cerámico, de la empresa Fv. Según el literal 4.7.2 de la norma NTE INEN 156 los resultados obtenidos para un mismo material, que en este caso sería el cemento tipo GU y el polvo cerámico realizados en laboratorios diferentes no deben diferir en más de 0.1, por tal motivo se determina que los valores obtenidos poseen una diferencia de 0.025 y 0.03 tanto para el cemento como para la cerámica respectivamente, los cuales están dentro de los rangos de validez de resultados.

Para poder obtener densidades para los diferentes porcentajes de componente cemento-cerámico preestablecidos en la investigación en curso, se realizó un ponderado de densidades como sigue en la Tabla 13 y representada en la Ilustración 5, mismas que se han determinado para posteriormente ser usadas en el cálculo de contenido de aire en morteros.

Tabla 13. Densidad ponderada

% Cerámica	% Cemento	Densidad ponderada (g/cm^3)
0.000	1.000	2.865
0.050	0.950	2.848
0.075	0.925	2.839
0.100	0.900	2.831
0.125	0.875	2.823
0.150	0.850	2.814

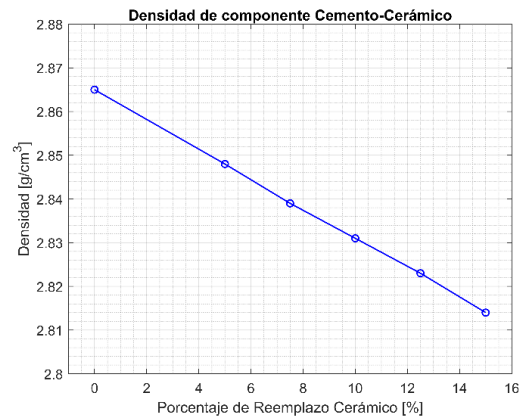


Figura 5. Densidad ponderada Vs Porcentaje de reemplazo cerámico

En la fotografía 8 se puede observar el frasco de Lechatelier.



Fotografía 8. Densidad de la cerámica en frasco de Lechatelier

3.6 Determinación de Contenido de aire en morteros

El aire contenido en morteros puede darse por las siguientes razones [25]:

- Aire originalmente presente en los espacios intergranulares entre el cemento y el agregado
- Aire originalmente disuelto en la mezcla de agua
- Aire que está plegado y envuelto dentro del concreto durante la mezcla y colocación.

Por tal motivo se realizó el ensayo correspondiente a la determinación de contenido de aire según lo estipulado en la

norma INEN 195, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 14:

Tabla 14. Contenido de aire en morteros.

% Cerámica	a/c	Masa para llenar 400 cm ³ (g)	Contenido de aire (%)
0	0.7660	826.40	5.96
5	0.7600	831.80	5.39
7.5	0.7540	824.40	6.31
10	0.7480	824.00	6.44
12.5	0.7420	823.60	6.56
15	0.7360	823.20	6.69

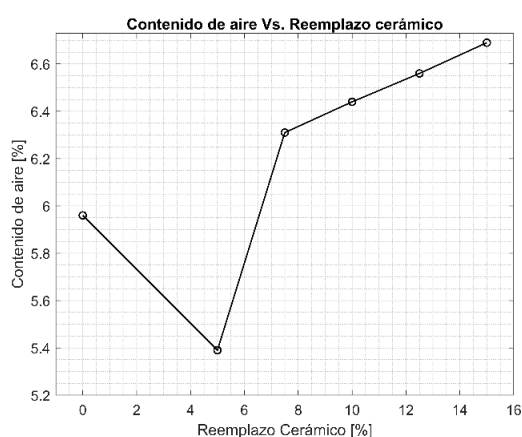


Figura 6. Contenido de aire Vs. Reemplazo cerámico.

Es notorio en la Ilustración 6 que el porcentaje que presenta menor contenido de aire en su mezcla corresponde al 5% de sustitución cerámica, sin embargo todos los porcentajes de sustitución parcial por polvo están por debajo del límite presentado en la Tabla 2 de Property Specification Requirements [26], misma que indica un valor máximo de contenido de aire para morteros del 12%.



Fotografía 9. Pesaje de mortero en molde para ensayo de contenido de aire.

4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos experimentalmente del presente estudio, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

La sustitución parcial de cemento en todos los porcentajes por polvo cerámico de residuos sanitarios planteados, no tiene mayor incidencia para los tiempos de fraguado inicial en tanto que para el fraguado final ayuda al mismo con 15 minutos de adelanto con respecto a la muestra patrón de control que es la del 0% de reemplazo cerámico, y esto se debe a la composición química de la cerámica con una importante cantidad de alúmina.

La sustitución de polvo cerámico no favorece en el aumento de la resistencia a la compresión para cementos hidráulicos, sin embargo se podría utilizar la sustitución del 5% siempre y cuando los índices de calidad de las cementeras aumenten en un 2.5% la resistencia a la compresión de sus cementos y de esta forma utilizar el componente cemento-cerámico para elementos estructurales.

La sustitución parcial de cemento por polvo cerámico genera un parámetro de densidad más bajo con respecto a la muestra de control del 0% de sustitución, y se debe a la baja densidad que presenta el material de desecho, ya que según la composición química posee menor cantidad de CaO y Fe_2O_3 los cuales son componentes más pesados.

La sustitución parcial de cemento por polvo cerámico es una posible solución

alternativa para la eliminación de residuos cerámicos si se usa este material para cementos de mampostería ya que para ese uso en específico la norma NTE INEN 1806 establece un menor valor de resistencia a la compresión, correspondiente a 20 MPa para los 28 días, por lo cual sería posible usar hasta la sustitución correspondiente al 15% de residuos cerámicos con un valor de 22.443 MPa a la edad de 28 días.

Para el resto de requisitos físicos normalizados para la caracterización de cementos hidráulicos tales como contenido de aire en morteros, cambio de longitud por autoclave se evidencia que la sustitución de cemento no tiene influencia sobre los mismos.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. Fascículo provincial Pichincha,” 2010.
- [2] F. Saravia and E. Hernández, “Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2018.
- [3] M. Castillo Pazmiño, “Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el distrito metropolitano de Quito,” *Ecología*, vol. 3, no. 2, p. 27, 2012.
- [4] L. Reig, M. A. Mas, J. Monzó, M. V. Borrachero, and J. Payá, “Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–12, 2015.
- [5] A. Halicka, P. Ogrodnik, and B. Zegardlo, “Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 295–305, 2013.
- [6] H. Higashiyama, F. Yagishita, M. Sano, and O. Takahashi, “Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 96–101, 2012.
- [7] NTE INEN 2380, *Cementos hidráulicos. Requisitos de funcionamiento para cementos hidráulicos*, vol. 1973. 2011.
- [8] NTE INEN 2502, *Cemento hidráulico. Determinación del flujo de morteros*, vol. 2502. 2009.
- [9] NTE INEN 158, *Cemento hidráulico. determinación del tiempo de fraguado. método de vicat.*, vol. 0158. 2009.
- [10] J. González, “Estudio del mortero de pega usado en el cantón Cuenca. Propuesta de mejora, utilizando adiciones de cal,” p. 111, 2016.
- [11] P. Viera and C. Chicaiza, “Uso De Residuos Cerámicos Como Sustituto Del Cemento Para Fabricación De Morteros,” *Ciencia*, vol. 20, no. 1, pp. 35–44, 2018.
- [12] W. Jackiewicz-Rek, K. Załękowski, A. Garbacz, and B. Bissonnette, “Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers,” *Procedia Eng.*, vol. 108, pp. 681–687, 2015.
- [13] NTE INEN 488, *Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista*, vol. 0488. 2009, p. 21.
- [14] M. P. León and F. Ramírez, “Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 25, no. 2, pp. 215–240, 2010.
- [15] D. Gaspar-Tébar, “Normalización del cemento. Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo,” *Mater. Construcción*, vol. 30, no. 178, pp. 39–57, 1980.
- [16] N. Anasi, “Módulo estático de

elasticidad del hormigón, en base a su resistencia a la compresión: $f'_c = 28 \text{ MPa}$, fabricado con materiales de la mina Villacres, ubicada en el sector de la península cantón ambato en la provincia de Tungurahua y cemento Holcim.,” Universidad Central del Ecuador facultad, 2013.

[17] NTE INEN 157, *Cemento Hidráulico. Determinación de la Consistencia Normal. Método de Vicat*. 2009.

[18] F. Baeza, J. Payá, O. Galao, J. M. Saval, and P. Garcés, “Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 645–653, 2014.

[19] J. C. Carrete and C. Químicas, “Observaciones acerca de la determinación de alúmina en cementos,” vol. 13, no. 3, 1963.

[20] A. V. Bloda, “La química del cemento Portland,” vol. 17, 1967.

[21] D. J. E. Veronelli, “El ensayo de expansión en autoclave como método de determinación de la estabilidad del cemento portland,” *Mater. Construcción*, vol. 22, no. 145, pp. 9–22, 1972.

[22] E. Monfore, “Propiedades de los cementos expansivos, hechos con cemento portland, yeso y cemento aluminoso,” © *Cons. Super. Investig. Científicas Licenc. Creat. Commons 3.0 España*, vol. 16, no. 6, pp. 19–29, 1966.

[23] NTE INEN 200, *Cemento hidráulico. Determinación de la expansión en Autoclave*, vol. 0200. 2009.

[24] NTE INEN 156, “Cemento hidráulico. Determinación de la densidad,” vol. 0156, 2009.

[25] T. L. Thomas, “The effects of air content, water-cement ratio, and aggregate type on the flexural fatigue strength of plain concrete,” *Iowa State University*, p. 100, 1979.

[26] The Brick Industry Association, “Mortars for Brickwork,” 2008.